

# 情報処理システムの性能評価(1)

紀 一誠

## 1. はじめに

システム性能評価 (Performance Evaluation) 技術とは、対象とするシステムのハードウェアやソフトウェアの構成が与えられ、システムにかかる負荷条件が明らかにされたもとの、そのシステムの稼動状態や利用者へのサービスの良し悪しを示す性能評価指標を定量的に明示する技術、と定義することができる。情報処理システムを利用する立場の一般利用者は、必要な機能と良好な応答時間が実現できている限り、システム性能評価技術そのものに関心をもつ機会は少ないかもしれない。しかし、システムを設計開発あるいは運用管理する立場にある技術者にとっては、担当する情報処理システムを成功に導くために、所定の性能が正しく実現できるかどうか、という視点からの定量的なシステム性能評価は欠かすことのできない大切な要素技術である。とりわけ、高度に発達した情報社会の公共基盤として機能する情報処理システムの場合には、性能トラブルでシステムが正常に稼動できない事態が発生すると、その社会的影響も計り知れない程大きくなる場合があり、そのいくつかの例が [2] に報告されている。

一般の情報処理システムでは、パーソナルコンピュータのように利用者がシステムを個人で独占して使用するような形態ではなく、複数の利用者が非同期にそれぞれに処理要求を発生するような形態をとる。この処理要求のことをシステム形態にあわせて、バッチ処理システムの場合には「ジョブ」、リアルタイム処理システムの場合には「トランザクション」とよんでいる。また、システムは一般に多種多様なハードウェア、ソフトウェア等

の構成要素を組み合わせて構成される。これらの構成要素は総称して、「システム資源」といわれる。オペレーティングシステムは、システム資源を効率よく使用しながら、利用者への十分なサービスを提供するために、様々なシステム資源の管理技法を駆使して、多種多様な処理要求を制御する。システム性能評価技術が主な対象とするのはこのようなシステムの総合的な性能である。システム性能を考える際に大切な視点は、システムの総合的な性能は単体性能の延長上には捉えられない、という点であろう。例えば、CPUを3倍速いものに置き換えたからといって、システム全体の処理能力が3倍向上するというものではない。システム性能を向上させるためには、単体性能の向上、並列処理機能の拡充、制御方式の改善等の総合的な対応が必要であり、何をどのように改善すればどこにどのような改善効果がどの程度期待できるのか、を定量的に明示する事がシステム性能評価技術の目的である。

## 2. ベンチマークテスト

ベンチマーク (Benchmark) テストとは、性能を比較したいシステム上に共通のプログラムを実行させ、その実行速度を計測して比較を行う方法である。システムの構成要素の中で中核的な役割をはたすCPUについては、標準的なベンチマークプログラムを用意して共通の評価指標のもとに実行速度を比較するという方法が昔から試みられている。最も良く知られているのは「MIPS」という単位であろう。MIPS (Millions Instructions Per Second) とは1秒間に100万命令を実行する速度を意味している。おもに、メインフレームシステムのマシンの性能を表示するのに用いられてきた。テストに使用されるプログラムは、Gibson Mix といわれる命令の出現頻度を規準にして、各メーカー毎に作成されている。ここで注意が必要なのは、UNIXをオペレーティングシステムとす

るワークステーション系のCPUの性能表示として使用されるMIPS値の場合は先に述べたメインフレーム系で使用される100万命令/秒という意味とは異なる意味で使用される点である。ワークステーション系のMIPS値とはDEC社のVAX-11/780というマシンの性能を1とした相対値の意味で使用され、一般にはドライストーン(Dhrystone)といわれるベンチマークプログラムを用いて計測される。同じ単位を使用しているが、両者は別物である。

CPUはシステム全体から見れば一構成要素であるが、ミクロに見ればそれ自体も演算装置、パイプライン、キャッシュ、データバス、メモリ等を装備した一つのシステムであり、その実行速度は命令の出現頻度だけではなく、そのアーキテクチャに依存して大きく変化する。そのため、特定の用途を想定して設計されたアーキテクチャに対応して、数値計算向け、記号処理向け、データベース処理向け、画像処理向け、等々のベンチマークプログラムが開発され使用されている。詳しくは[6]を参照。ベンチマークテストは共通のテストプログラムが実行されてこそ比較の意味がある。また、できることならベンチマークプログラムは利用者の実際に使用するプログラムの動作を忠実に表現したものであって欲しい。そのようなことから、メーカ毎に異なるテストプログラムを用い、命令の出現頻度のみを強く意識したMIPS値による評価指標に代わり、中立的な立場に立つ非営利の標準化団体によるベンチマークプログラムの開発が行われるようになり、現在普及の過程にある。その代表的なものが、オンライン・トランザクション処理(OLTP:On Line Transaction Processing)の性能を測るベンチマークテストを開発するTPC(Transaction Processing Performance Council:トランザクション処理性能評議会)、主としてワークステーション系の標準ベンチマークの開発を行うSPEC(Systems Performance Evaluation Cooperative:システム性能評議会)、パソコン向けベンチマークを手掛けるBAPCo(Business Application Performance Corporation)である[3]。この内、TPCベンチマークは他と性格を異にしている。SPECおよびBAPCoが基本的には単体としてのCPU性能を測定する事を想定しているのに対して、TPCは業務を想定した標準的なトランザクションを設定し、データベースシステムを備えたサーバシステムに対して、複数の利用者から同時にトランザクションが発生する状況での性能測定を行う。まさに、システム性能を測定することを目的

としている。TPCベンチマークは現在、TPC-A,TPC-B,TPC-Cの3種類の標準ベンチマークが定義されている。定義には、トランザクションプロファイル、データベース構成、測定環境、測定条件、応答時間の定義、価格に含まれるもの、完全に開示した報告書、第三者による監査、等々が含まれている。これらを完全に満たす条件で測定試験を行い、報告書をTPCに送付し、認定が得られればそのシステムの価格/性能値を公示してよい事になっている。

ベンチマークテストは単純なMIPS値比較には始まり、総合的なシステム性能を計測するTPCベンチマークテストへと発展をしてきた。本当に比較したり知りたいものはシステムの個々の構成要素の性能ではなく、利用者および運用管理者からみた総合的なシステム性能である、という事を考えるとその意義は大きい。しかし、ベンチマークはあくまで性能比較のための標準テストであるという性格は変わるものではない。特定のアプリケーションシステムの性能はそのシステムの個性にそって評価しなければならないことはいうまでもない。また、標準ベンチマークが一度設定されると、その条件に合わせて高速化をはかる特殊な工夫が加えられ記録のみをねらう動きが生ずる事にも注意しておかなければならないだろう。結論として、いかなるベンチマークテストもシステム性能の一つのめやすに過ぎない、という事が言えよう。

### 3. 利用者特性

システム性能評価の第一歩は利用者がどのようなシステムの使い方をするのか、言い換えれば利用者はどのような形の負荷をシステムにかけてくるのかを知ることから始まる。利用者からの負荷を総称して、利用者特性あるいは利用者習性(ワークロード:Work Load)という。トランザクション処理システムを例にとり、必要なワークロード情報を以下に示す。

- トランザクション種別: 利用者特性を表現するために必要なトランザクションの種類。特徴的なもの、負荷として大きな割合を占めそうなもの等を選別する。
- トランザクション毎のシステム資源使用時間(シングルプロファイル): 上記に選ばれたトランザクション毎に、1トランザクション処理を行う間に使用するシステム資源の使用時間を各システム資源毎に求める。

- 負荷発生率(ワークロードミックス): 各トランザクション毎の負荷発生率の比(%).
- トランザクション発生率: 単位時間あたりに発生(到着)するトランザクション数(件/秒).

以上に得られる情報をワークロードプロファイル(Work Load Profile)という。ワークロードプロファイルは利用者がシステムをどのように利用するかという利用者固有の情報と、システム内部でそれぞれの処理がどのように行われるのかというシステム設計に関わる情報とが含まれている。

利用特性に関する情報は性能評価の前提になる重要な情報なので、正確な情報の収集と利用者の十分な合意を得ておくことが大切である。この利用者特性を読み間違えたため、深刻な性能問題を引き起こしてしまい、システムが稼働できずに失敗した例が日経コンピュータの「動かないコンピュータシステム」に紹介されており[5]、教訓的である。

### 3.1 平均ワークロード

ワークロードプロファイルが得られるとワークロードミックス情報をもとに、負荷の平均的な特性を表現する平均ワークロードを構成することができる。いま、 $M$ 種類のトランザクションと $N$ 種類のシステム資源でワークロードプロファイルが構成されているものとする。トランザクション $i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ )の資源 $j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ )の使用時間を $u_{ij}$ 、発生率比を $\varphi_i$ 、トランザクションの到着率(件/時間)を $\lambda$ とする。ただし、

$$\sum_{i=1}^M \varphi_i = 1$$

とする。このとき、平均ワークロードにおけるシステム資源 $j$ の使用時間 $u_j$ は以下に得られる。

$$u_j = \sum_{i=1}^M u_{ij} \varphi_i \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

また、トランザクション $i$ の到着率は $\lambda_i = \lambda \varphi_i$ となる。

### 3.2 負荷変動への対応

システムにかかる負荷は常に変動をしている。例えば、一日のトランザクション発生量を時間帯毎に調べると、午前半ばと午後半ばにピークがあり、昼休みには負荷が低くなるような事が観測される場合がある。変動する負荷に対しては、ある時間を区切ってその間の負荷の平均値をとることが最も一般的である。どのような時間

帯での平均負荷を考えているのかによって性能評価結果のもつ意味が異なってくる。負荷変動をみるためよく用いられるものとしては、月変動、週変動、日変動、時間変動に加えて、最も負荷の高い時間帯の特性を用いる最繁忙時負荷がある。ひとたび平均値を得た後はその時間帯では定常状態が続いていると考えて種々の性能評価指標を算出して行く。

## 4. システム性能評価指標

システムの性能を定量的に示す指標を性能評価指標という。総合的なシステム性能みるための性能評価指標は、システムの利用者側の視点からのものとシステムの運用管理者側の視点のもの、大きく2種類に分けることができる。利用者側の視点からのものは、サービスレベルに関する指標で、トランザクション応答時間(Response Time)およびジョブのTAT(Turn Around Time)があげられ、運用管理者側の視点からは、システム資源の使用率、スループット等があげられる。

### 4.1 応答時間の定義

トランザクションの応答時間ならびにジョブのTATは、どちらも利用者が処理をシステムに依頼してからその応答をもらうまでの時間として定義される。ここでは、前に紹介したTPCによる応答時間の定義をクライアントサーバ型のシステム(図1)の例にそって紹介する。トランザクションの応答時間 $RT$ (Response Time)は以下のように定義される。

$$RT = T_2 - T_1. \quad (2)$$

ここで、 $T_1, T_2$ は以下のように定義される。

$T_1$ : 入力メッセージの第1バイトがクライアント(端末)側からサーバ側に送信される直前の時刻。

$T_2$ : 出力メッセージの第1バイトがサーバ側からクライアント側に到着した直後の時刻。

また、クライアント使用者がデータを入力したり考えたりしている時間をクライアント思考時間あるいはデータ入力時間という。この間はクライアント側での処理が行われるだけであり、ネットワークやサーバ側には負荷はかかっていない。応答時間とクライアント思考時間を足したものをサイクルタイムと言うことがある。これらの関係を図2に示す。

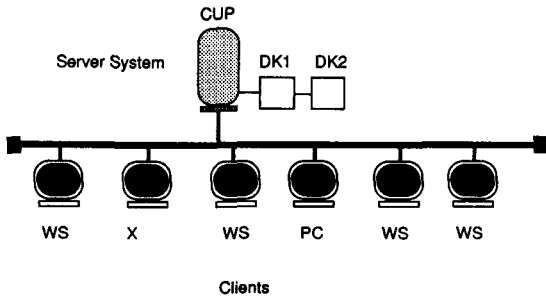


図 1: クライアントサーバシステムの一例

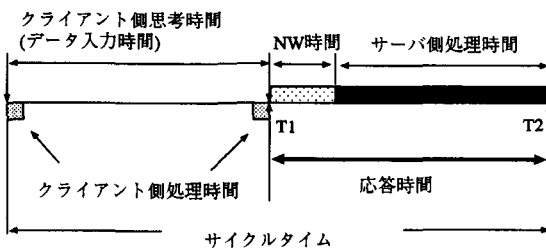


図 2: 応答時間, 思考時間, サイクルタイム

## 4.2 平均応答時間と 90% 値

応答時間は図 2 に示されるように、ネットワーク内を通過する時間とサーバ側の処理時間から構成されている。複数のクライアントから非同期にトランザクションが発生している状況では、ネットワークおよびサーバの内部のシステム資源 (CPU, DB DISK, 他) で競合が発生し、処理待ち時間が発生する。この待ち時間は負荷 (発生トランザクション数) が増加するにつれ増加するため、応答時間も負荷の増加とともに増加し、利用者へのサービスレベルは低下する。トランザクションの応答時間を測定すると一般にはバラツキが観測される。この時、トランザクションについての平均応答時間やその分布を調べてみる事ができる。これらは観測された平均応答時間、観測された応答時間分布といわれる。

一般に、確率変数  $X (\geq 0)$  とその分布関数  $F(x) = P(X \leq x)$  が与えられたとき、その分布の  $\alpha$  % 値とは、 $\alpha = F(x)$  となるような  $x$  を意味する。TPC-A ベンチマークでは、「定常状態」のもとに 15 分間程度の測定を行い、その間に開始し終了したトランザクションの内 90

% の応答時間は 2 秒以内でなければならない、と定められている。即ち応答時間の 90 % 値は 2 秒以内である事が要求されている。さらに、平均応答時間、応答時間の最大値をはじめ様々な計測結果を報告する事が義務付けられている。

ベンチマークテストあるいはシミュレーションのように応答時間分布が測定により得られる場合には平均応答時間や応答時間の 90 % 値を求めるのは何の困難もない。しかし、待ち行列モデルを利用して性能予測を行う場合に平均応答時間と応答時間の  $\alpha$  % 値の関係を求める事は大変に難しい問題であり、種々の有効な手段を提供してきた待ち行列理論も残念ながらまだこの問題を解決できるレベルには達していない。そうはいつても、実務上は何らかの目安を示唆する必要に迫られる事も多い。その場合には、待ち行列モデルの中で最も簡単な M/M/1 待ち行列モデルにおいて、系内滞在時間 (待ち時間 + 処理時間) は指数分布に従う事を利用し、 $\alpha$  % 値  $u(\alpha)$  を次のように求める事ができる。

$$u(\alpha) = -U \ln(1 - \alpha) \quad (3)$$

ここで、 $U$  は客の平均系内滞在時間即ち平均応答時間、 $\ln$  は  $e$  を底とする対数である。関係式 (3) から応答時間の  $\alpha$  % 値が分かった場合の平均応答時間を求める事ができる。例えば TPC に規定される条件である 90 % 値が 2 秒の場合には、 $2.0 = -U \ln(1 - 0.9)$  から  $U = 0.87$  が得られ、平均応答時間は約 0.87 秒であることが分かる。また、式 (3) からは平均応答時間が得られた場合に応答時間の 90 % 値を予測するためにも利用できる。例えば、平均応答時間が 2 秒の場合には応答時間の 90 % 値は、 $u(0.9) = -2.0 \ln(1 - 0.9) \doteq 4.6$ 、から約 4.6 秒であることが分かる。

## 4.3 スループット

スループットとは単位時間あたりにシステムが処理を行ったトランザクションあるいはジョブの件数のことをいい、システム効率に関する性能評価指標として用いられる。特に OLTP の場合にはスループットの単位として 1 秒間に処理されるトランザクション数である TPS (Transactions Per Second) が用いられる。

## 4.4 システム資源の使用率

システム資源の使用率はシステム運用の効率を判断する一つの指標であり、運用対象となる時間に対する資源使用時間の比として定義される。

資源の使用率が高いほど有効利用されているといえるが、同時に使用率が高いほど競合の発生も多く、待ち時間の増加による応答時間の悪化が発生するのでその関係をよく見極めることが必要である。資源の使用率は簡明な指標であるため、経験的な設計ガイドラインとして、例えば CPU 使用率は 80% 以下、DK(ディスク) 使用率は 30% 以下になるように設計すること、といったように使用される場合がある。しかし、これは大きな危険をもっている。システムはそれぞれ個性をもっており、どの程度の資源使用率を基準として設計を行うのかは個別に検討していかなければならないし、またそれがシステム技術者の仕事でもある。

## 5. 指標間の関係

サービスレベルに関する性能評価指標とシステム効率に関する性能評価指標は相反する関係にある。運用管理者はシステムをなるべく効率良く運用するためシステム資源の使用率を向上させたいと考える。一方利用者はなるべく迅速な応答を期待したい。しかし、負荷を増加させシステム資源の使用率を上げると応答時間は悪化する。即ち、両者の要求を同時に満足させることは原理的に無理なことなのである。システム性能評価の役割はこれらの評価指標間の関係を定量的に示すことによって、システム設計や運用管理を支援することにある。

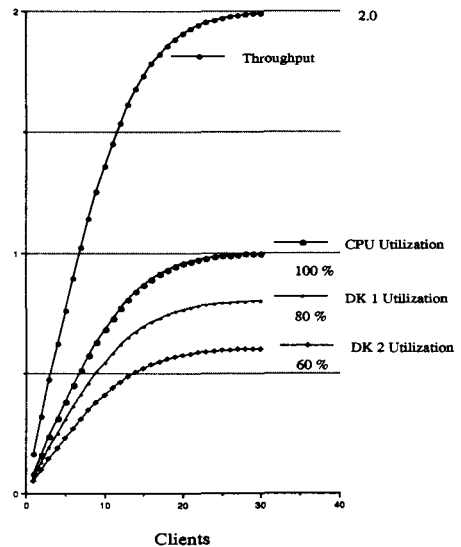
以下にこれらの指標の間にある一般的な関係を以下の例題を通して示す。CPU と 2 台のデータベース (DB) DISK を装備したサーバマシンにネットワークを介して  $n$  台のクライアントが接続されているクライアント・サーバモデルを考える。図 1 参照。次のようなシングルプロファイルワークロードを想定する。即ち、1 トランザクションあたりの資源使用時間は、CPU 時間 0.5 秒、DB DISK(1) および DB DISK(2) のアクセス時間がそれぞれ、0.4 秒、0.3 秒であるとする。また、クライアント側での思考時間(データ入力時間)が 5 秒と与えられているとする。本例は、後に説明するセントラルサーバモデルを用いることにより、様々な性能評価指標を計算することができる。

### 5.1 資源使用率とボトルネック

システム全体の処理能力の上限値を決定付ける資源のことをボトルネックという。どのシステム資源がボトルネックになるかはそれぞれの資源の使用率を計算してみることにより分かる。クライアント数を増やしていった場合の資源使用率およびスループット (TPS) の関係を図

3 に示す。図 3 から分かるように、クライアント数の増加に従いスループット並びに各システム資源の使用率は上昇して行き、次第にある上限値に漸近して行く。最も速く使用率が上昇するのは CPU であり、その使用率は次第に 1 に近づく。従って、この場合には、CPU がこのシステムのボトルネックである。その他のシステム資源 DK1、DK2 の使用率はそれぞれ、80%、60% に漸近する。CPU がボトルネックであるため、負荷を増加しても使用率は 100% に近づくことはない。スループットは上限値 2.0 TPS に漸近する。このことは、CPU がボトルネックであり、1 トランザクション当たりの CPU 時間が 0.5 秒であることから容易に理解される。

Throughput and Resource Utilizations

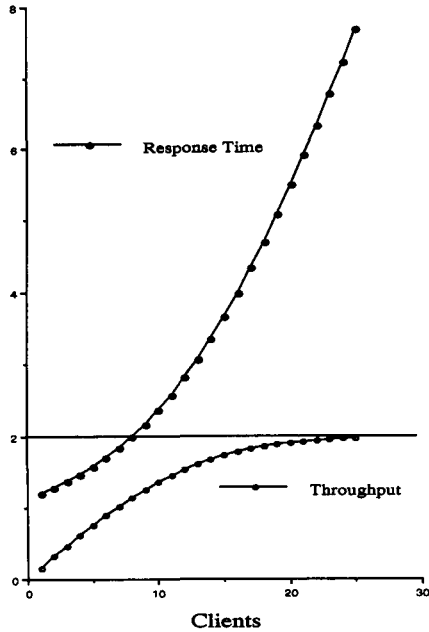


縦軸：使用率(× 100 %), スループット (件 / 秒)

図 3: 使用率とスループットの関係

### 5.2 スループットと応答時間

使用率とスループットの間を 図 4 に示す。クライアント数の増加につれ平均応答時間は、始めのうちは急速に増加するが、次第に増加傾向は直線的になって来る。本例では CPU がボトルネックであるため、負荷が大きい状態では系内に滞り状態に陥り、平均応答時間は傾きが 0.5 (CPU 使用時間) の直線に漸近して行く。



縦軸：応答時間(秒)，スループット(件/秒)

図4: スループットと応答時間の関係

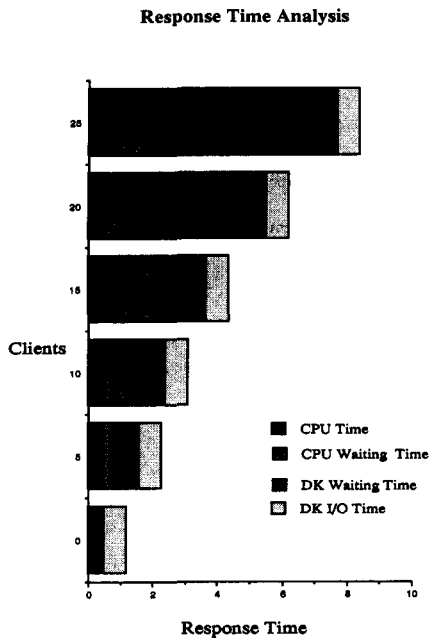


図5: 応答時間分析

負荷の増加に伴い応答時間も増加して行く。図5にその増加の原因となる資源待ち時間の増加の様子を各資源毎に分析した結果を示す。待ち時間の増加は各資源について一様ではなく、ボトルネックであるCPUの待ち時間の増加が最も激しいことが分かる。

## 6. おわりに

情報処理システムの性能評価を行うためには、対象となるシステムに関する十分な理解がまず必要となる。それに加えて、ベンチマークテスト技術、システム測定技術、シミュレーション技術、待ち行列理論等の様々な理論や技術が総合的に必要とされる。また、設計開発から運用管理にいたる各段階でシステム性能評価の目的、利用できる情報、作業工数、納期等々も変わるため、それらの要素技術をどのように駆使すれば効果的な性能評価が実施できるのかも変わってくる。急速な技術革新が続く情報処理システムの性能評価を的確にかつ迅速に実行するためには、性能評価に関する明確な方法論とそれを手順化して示すマニュアルの整備、それに沿って効率的に性能評価作業を進めることのできるさまざまなツール群の開発整備が欠かすことができない。本稿では、まず性能評価とはどんなものであるかの一端を紹介し、引き続き技術解説の導入とした。

## 参考文献

- [1] J. グレイ他著，渡辺栄一訳：OLTPシステム [オンライントランザクション処理]，マグロウヒル，1991.
- [2] 続発するオンライン事故 大量トランザクションゆえの落とし穴：日経コンピュータ，1988,7.18.
- [3] システム性能評価もオープン時代に，日経コンピュータ，1992,9.21.
- [4] 杉浦和史，必要性高まるシステムの事前性能評価，日経コンピュータ，1991,6.3.
- [5] 田口潤：ピーク時の処理能力読み違い実用化目前にダウン，動かないコンピュータシステム，日経コンピュータ 1987, 2.2.
- [6] 特集：ベンチマーク，情報処理，vol.31, no.3, 1990.